

ผลกระทบของปริมาณซิลิกาอสัณฐานในดินขาวเผา ต่อกำลังอัด และปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์เพสต์ผสม

ปิยะฉัตร ศุภวิทยาเจริญกุล¹ และ ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ²

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาปริมาณซิลิกาอสัณฐานในดินขาวเผา โดยใช้เทคนิควิเคราะห์ปริมาณซิลิกาอสัณฐานด้วยรังสีเอ็กซ์เรย์แบบเลี้ยวเบน (X-ray diffraction method) ซึ่งส่งผลต่อกำลังอัดและปฏิกิริยาปอซโซลาน งานวิจัยนี้ได้นำดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส กำหนดระยะเวลาในการเผา 4 6 และ 8 ชั่วโมงควบคุมขนาดอนุภาคของดินขาวและทรายให้ใกล้เคียงปูนซีเมนต์ โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ชว่งน้ำหนักควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.42 ซึ่งใช้ในทุกส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ ผลการทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์เรย์แสดงให้เห็นว่าดินขาวเผาด้วยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมงมีปริมาณซิลิกาอสัณฐานสูงที่สุดและปริมาณซิลิกาอสัณฐานมีผลต่อกำลังอัดและปฏิกิริยาปอซโซลานในซีเมนต์เพสต์ผสม

คำสำคัญ: ดินขาวเผา, ปฏิกิริยาปอซโซลาน, การวิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์เรย์

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-4422-4421, E-mail: Piyachat_ann@hotmail.com

Influence of Amorphous Silica in Metakaolin on the Compressive Strength and Pozzolanic Reaction of Blended Cement Paste

Piyachat Suphawithayajaroenkun^{1*} and Threerawat Sinsiri²

Abstract

The aim of this study is to determine the percent by weight of amorphous silica in metakaolin using X-ray diffraction method. This factor affects the compressive strength and degree of pozzolanic reaction. Kaolin was burned at different temperatures of 600 700 and 800^oc. Burning periods were varied among 4 6 and 8 hr. Metakaolin and sand were ground to have their particle size close to that of Portland cement. They were then used as a direct replacement of Portland cement Type I at 20 percent by weight of binder. A water to binder ratio of 0.42 was used for all cement paste mixture. Results from X-ray diffraction show that the metakaolin burned at 600^oc for 4 hr. had the most amorphous silica. The result shows that the percent by weight of amorphous silica contents affects compressive strength and degree of pozzolanic reaction in blended cement paste

Key words : metakaolin, Pozzolanic reaction, X-ray diffraction method

¹ Master Degree Graduate, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

² Assistant Professor, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

* Corresponding Author Tel. 0-4422-4420, E-mail: Piyachat_ann@hotmail.com

1. บทนำ

ปัจจุบันโครงสร้างส่วนใหญ่ในงานวิศวกรรมโยธาเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กไม่ว่าจะเป็น ที่อยู่อาศัย สำนักงาน ถนน ฯลฯ ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุสำคัญที่ใช้ในงานคอนกรีต อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นใช้ปริมาณเชื้อเพลิงและพลังงานสูงมากจากข้อมูลพบว่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์มีมากถึงปีละ 13,500 ล้านตันหรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาในบรรยากาศทั้งหมด [1] ก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน (Global Warming) จากปัญหาดังกล่าวนักวิจัยได้หาแนวทางลดการใช้ปูนซีเมนต์ โดยใช้วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials) ตามกำหนดของมาตรฐาน ASTM C 618 (2001) [2] ได้กล่าวไว้ว่าวัสดุปอซโซลาน คือ วัสดุที่มีซิลิกาเพียงอย่างเดียวหรือมีทั้งซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบ วัสดุปอซโซลานนอกจากจะลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์แล้วยังปรับปรุงคุณภาพอื่น ๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้น วิธีการพัฒนาคุณภาพวัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้คือให้ความร้อนหรือการเผา ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเคมีภายในของวัสดุ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเผาได้แก่กลบที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมจะช่วยประสิทธิภาพให้แก่ซีเมนต์เฟสผสม และนอกจากนั้นการเผาไดอะตอมไมท์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับการเผาที่อุณหภูมิ 0 200 350 และ 700 องศาเซลเซียสเมื่อนำมาผสมทำอิฐมวลเบา จะได้กำลังอัดสูงที่สุด [3]

ดินขาวปราจีน เป็นดินมีลักษณะเป็นสีขาว แต่ไม่ขาวมากหรือสีชมพู ขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุเหล็กที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปโดยเป็นซิลิกาไดออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ ที่มีมวลโมเลกุลต่ำอยู่ในปริมาณที่มาก [4] การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในซีเมนต์เฟสผสมโดยปกติวัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน แต่ถ้ามีความละเอียดและความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานเช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่จะเกิดช้าเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน [5] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัยหลัก คือ พื้นที่ผิวจำเพาะการกระจายอนุภาคและปริมาณของซิลิกาอสัณฐาน [6] การศึกษา

ปริมาณของ ซิลิกาอสัณฐานนั้นยังมีน้อย โดยเฉพาะการวัดปริมาณของซิลิกาอสัณฐานในวัสดุปอซโซลาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาปริมาณของซิลิกาอสัณฐานในดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาและทำให้ส่งผลต่อกำลังอัดและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน เพื่อเป็นการพัฒนาคุณภาพของวัสดุปอซโซลานในระดับอนุภาคต่อไป

การวัดหาปริมาณของซิลิกาอสัณฐานสามารถทำได้หลายวิธีไม่ว่าจะเป็นการใช้วิธีการริสเวลต์ (Rietveld Method) การวิเคราะห์โดยรังสีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (Quantitative Analysis by X-ray Diffraction) ด้านปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถศึกษาได้หลายวิธีเช่นกัน จากมาตรฐาน ASTM C168 รังสีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD), การทดสอบความร้อน และการไตรเตอร์ทางานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาดินขาวปราจีนภายใต้ขอบเขตการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ใช้เผา 4 6 และ 8 ชั่วโมง วิเคราะห์ผลของอสัณฐานโดยใช้วิธีวิเคราะห์สารประกอบด้วยรังสีเอ็กซ์เรย์ และเปรียบเทียบความสอดคล้องปริมาณซิลิกาอสัณฐานต่อกำลังอัดและปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2.1.2 ดินขาวจากแหล่งปราจีนผ่านการเผาอุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ใช้เผา 4 6 และ 8 ชั่วโมง

2.1.3 น้ำที่ใช้ผสมเป็นน้ำประปา

2.2 การเตรียมวัสดุ

บดดินขาวและทรายด้วยเครื่องบดด้วยน้ำควบคุมให้ขนาดอนุภาคให้ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ทดสอบด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคโดยใช้การบดด้วยน้ำ หลังจากนั้นนำดินขาวที่ผ่านการบด เผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ใช้เผา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวลงด้วยอากาศภายในเตารอการผสม ในกระบวนการผสมจะปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C 311

2.3 อัตราส่วนผสม

เตรียมตัวอย่างซีเมนต์เฟสด้วยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.42 นำดินขาวหรือทรายบดแทนที่

ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ใส่ลงไปในแบบหล่อตามมาตรฐาน ASTM C 109 ขนาด 50X50X50 มิลลิเมตรถอดแบบแล้วนำตัวอย่างไปบ่มด้วยน้ำ ทดสอบกำลังอัดที่ 3 28 และ 60 วัน

2.4 การหาปริมาณซิลิกาอสัณฐาน ด้วยวิธีการวิเคราะห์สารประกอบด้วยรังสีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันโดยใช้สารมาตรฐานภายนอก

ปริมาณวิเคราะห์โดยใช้สารมาตรฐานภายนอก [7] เป็นวิธีวิเคราะห์ชุดผสมระหว่างสาร 3 ชนิดได้แก่ ซิลิกาไดออกไซด์อสัณฐาน (Amorphase Silica) ซิลิกาไดออกไซด์ผลึก (Crystals Silica) และอลูมินาออกไซด์ (Aluminaoxide) โดยผสมซิลิกาไดออกไซด์อสัณฐาน มีค่าความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 กับซิลิกาไดออกไซด์ผลึก ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 และอลูมินาออกไซด์ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ในอัตราส่วน AM:C:AI (Amorphase Silica : Silica Crystal : Alumina) โดยควบคุมให้น้ำหนักของอลูมินาออกไซด์คงที่ 2 กรัม และแปรผันน้ำหนักของ AM:C ร้อยละโดยน้ำหนักดังนี้ 100:0 80:20 60:40 40:60 และ 20:80 จากนั้นนำมาวิเคราะห์โดยรังสีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟซิลิกาอสัณฐานต่อพื้นที่ใต้กราฟตัวแทนของอลูมินาออกไซด์และร้อยละส่วนผสมของซิลิกาอสัณฐาน สมการความสัมพันธ์ที่ได้จะเป็นสมการที่ใช้เพื่อเทียบกับซิลิกาไดออกไซด์ทั้งหมดเพื่อหาร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานในดินขาวเผาจากตัวอย่างอื่น ๆ ต่อไป

2.5 การหาปริมาณซิลิกาอสัณฐานในดินขาวเผา

นำดินขาวเผาที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนดข้างต้น ปริมาณ 2 กรัมในแต่ละตัวอย่างทดสอบผสมกับอลูมินาออกไซด์ในอัตราส่วนคงที่ 2 กรัมวิเคราะห์โดยวิธีโดยเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันหาอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟในส่วนของซิลิกาอสัณฐานต่อพื้นที่ใต้กราฟตัวแทนของอลูมินาออกไซด์ ค่าที่ได้จะถูกนำมาแทนค่าในสมการกราฟมาตรฐานเป็นค่า X เพื่อหาปริมาณซิลิกาอสัณฐานซึ่งก็คือค่า y ต่อไป

2.6 ร้อยละกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

ผลเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานในซีเมนต์เพสต์ผสม โดยการทดสอบร้อยละกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

ผสมทรายบด ผ่านการควบคุมให้มีขนาดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 เป็นตัวแทนกำลังอัดในส่วนไม่เกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาเปรียบเทียบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ด้วยดินขาวเผาร้อยละ 20 [8] ดังแสดงในสมการ

$$\% \text{ ปฏิกิริยาปอซโซลาน} = \frac{A-B}{B} \times 100 \quad (1)$$

A กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวเผา ร้อยละ 20

B กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์แทนที่ด้วยทราย ร้อยละ 20

2.7 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

AM:C คือ อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานต่อซิลิกาผลึก

K..t.t คือ ดินขาวผ่านการเผาที่.....องศาเซลเซียสเวลาเผา.....ชั่วโมง

AI คือ อลูมินาออกไซด์

IN_{AM} คือ พื้นที่ใต้กราฟของซิลิกาอสัณฐาน

IN_{AI} คือ พื้นที่ใต้กราฟตัวแทนของอลูมินาออกไซด์

3. ผลการทดลอง

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาว

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวแสดงในตารางที่ 1 พบว่ามีสารประกอบออกไซด์ของซิลิกาไดออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ไรออกไซด์ (Fe₂O₃) รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 ค่า LOI ไม่มากกว่าร้อยละ 10 และ SO₃ ไม่มากกว่าร้อยละ 4 ดังนั้นจึงจัดเป็นวัสดุปอซโซลานชั้น N ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2001)

ดังนั้นจึงจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน ชั้น N ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2001) และจากปริมาณซิลิกาไดออกไซด์ที่พบมีค่ามากกว่าร้อยละ 50 แสดงให้เห็นว่าดินขาวปราจีนมีซิลิกาอยู่มากเหมาะแก่การทดสอบหาปริมาณซิลิกาอสัณฐาน

3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

จากตารางที่ 2 พบว่า ขนาดอนุภาคของดินขาวและทรายมีขนาด 14.37 และ 14.02 μm ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับขนาดของปูนซีเมนต์ที่มีขนาด 14.40 μm

นอกจากนั้น ความถ่วงจำเพาะของดินขาวและทรายมีค่าเท่ากับ 2.67 และ 2.69 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าทั้งดินขาวและทรายมีความพรุนมากกว่าปูนซีเมนต์

การควบคุมขนาดอนุภาคของดินขาวปราจีนมีความสำคัญ เพื่อลดผลของกำลังอัดเนื่องจากส่วนคละ

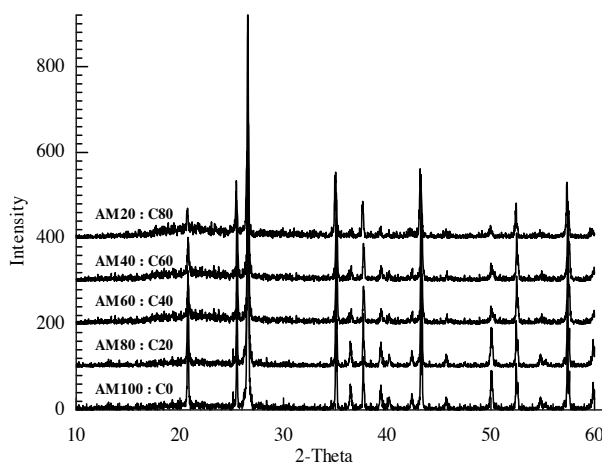
ของขนาดอนุภาค เป็นการลดพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อกำลังอัด ส่งผลให้กำลังอัดที่ได้จากการทดสอบแสดงออกเฉพาะในส่วนที่เกิดเนื่องจากผลของปริมาณซิลิกาอสัณฐานและปฏิกิริยาปอซโซลานที่ต้องการทำการวัดเท่านั้น

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Oxide (%)	Portland cement(%)	Kaolin(%)
SiO ₂	18.12	51.22
Al ₂ O ₃	3.58	30.76
Fe ₂ O ₃	3.63	6.68
CaO	67.59	3324 ppm
K ₂ O	1.8	3499 ppm
SO ₃	3.33	656 ppm
Loss on Ignition (LOI)	1.56	9.71

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

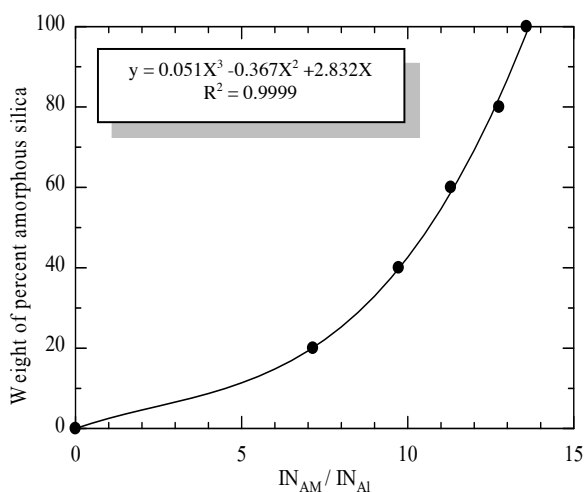
Name	Partical size(μm)	Specific gravity
Portland Cement	14.40	3.15
Kaolin	14.37	2.67
Sand	14.02	2.69



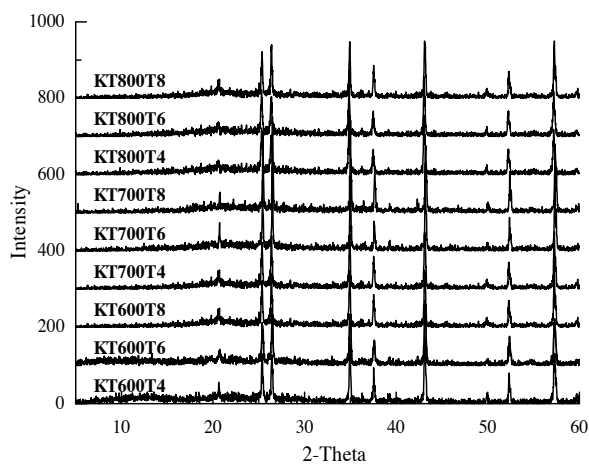
รูปที่ 1 แสดงกราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของสารผสมที่อัตราส่วนผสม AM : C : AI ตามกำหนด

ตารางที่ 3 แสดงความเข้มข้น (Intensity) ของซิลิกาอสัณฐานและอลูมินา

Ratio (AM:C) (%)	Intensity of Amorphous silica	Intensity of Aluminaoxide	IN_{AM}/IN_{Al}
100 : 0	184.410	13.58	13.58
80 : 20	173.145	13.58	12.75
60 : 40	153.454	13.58	11.30
40 : 60	132.133	13.58	9.73
20 : 80	97.097	13.58	7.15
0 : 100	0	13.58	0



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน IN_{AM} และ IN_{Al} กับร้อยละโดยน้ำหนัก



รูปที่ 3 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง

ตารางที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานและปฏิกิริยาปอซโซลาน

Type	Weight of percent amorphous silica	Compressive strength(ksc.) at 28 days in state of 20%		Percentage compressive strength due to pozzolanic reaction
		metakaolin	sand	
KT600T4	14.18	770.38	719.80	7.04
KT600T6	11.79	761.09	719.80	5.75
KT600T8	9.64	759.84	719.80	5.57
KT700T4	7.45	751.12	719.80	4.36
KT700T6	7.34	745.66	719.80	3.60
KT700T8	6.85	740.19	719.80	2.84
KT800T4	6.29	737.45	719.80	2.46
KT800T6	5.29	730.15	719.80	1.45
KT800T8	4.64	723.86	719.80	0.57

3.3 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของสารมาตรฐานซิลิกาไดออกไซด์และการหาร้อยละซิลิกาอสัณฐานของดินขาวเผา

รูปที่ 1 แสดงกราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของผสมระหว่างซิลิกาอสัณฐานและซิลิกาที่เป็นผลึก ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ กันดังแสดงในตารางที่ 3 โดยควบคุมน้ำหนักอลูมินาคงที่ พบว่าที่ตำแหน่ง 2-Theta ที่ 15-26 จะเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมของซิลิกาอสัณฐาน[9] ตำแหน่ง 2-Theta ที่ 43.04-43.44 เมื่อเทียบข้อมูลกลางนั้นเป็นตำแหน่งพื้นที่ได้กราฟตัวแทนของอลูมินา

ตำแหน่ง 2-Theta ที่ 15-26 จะมีลักษณะโค้งระฆังคว่ำซึ่งแสดงออกถึงลักษณะอสัณฐานของสาร และเมื่อผสมซิลิกาอสัณฐานในอัตราส่วนที่มากขึ้นจะพบว่าความเข้มข้นจะเพิ่มมากขึ้นตรงตามอัตราส่วนที่ผสมลงไปดังแสดงในตารางที่ 3 ส่วน 2-Theta ที่ 43.04-43.44 ซึ่งเป็นความเข้มข้น พิคตัวแทนของอลูมินาจะพบว่าความเข้มข้น ของอลูมินาจะคงที่ เหตุเพราะในการผสมของผสมในแต่ละอัตราส่วนอลูมินาจะถูกใส่ในอัตราส่วนคงที่ กราฟดังกล่าวจึงแสดง intensity ที่ไม่เปลี่ยนแปลงสังเกตได้จากความกว้างและความสูงของกราฟ

ผลของกราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันแสดงการเปลี่ยนแปลงไปของความเข้มข้นในส่วนของซิลิกาอสัณฐาน เป็นการบ่งบอกถึงพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของซิลิกาอสัณฐาน และ

อลูมินา กับร้อยละปริมาณของซิลิกาอสัณฐานที่ใช้ผสม จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนำคู่อันดับมาพล็อตกราฟจากคู่อันดับแสดงในรูปที่ 2 และได้สมการ

$$y = 0.051X^3 - 0.367X^2 + 2.832X \quad (2)$$

โดยที่สมการดังกล่าวมีค่า R^2 เท่ากับ 0.999

จากรูปที่ 2 พบว่ากราฟที่ได้จะเป็นกราฟมาตรฐานเพื่อหาร้อยละซิลิกาอสัณฐานโดยน้ำหนัก เส้นกราฟจะเป็นเส้นแนวโน้ม (Trend Line) จากความสัมพันธ์ของคู่อันดับสมการที่เป็นสมการอธิบายผลของพฤติกรรมปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากผลของความเข้มข้นของซิลิกาอสัณฐานต่อความเข้มข้นของอลูมินา โดยลักษณะกราฟจะมีการเพิ่มขึ้นของร้อยละโดยปริมาณซิลิกา อสัณฐาน ที่อัตราส่วนของ IN_{AM}/IN_{Al} อยู่ในช่วง 0-7.25 มีค้อย่างน้อยสังเกตได้จากเส้นความชันที่เกิดขึ้นมีไม่มากนัก และจะเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่ออัตราส่วน IN_{AM}/IN_{Al} อยู่ในช่วง 7.25-14.5 โดยประมาณสังเกตได้จากความชันของกราฟในช่วงดังกล่าวมีความชันมากขึ้นและสิ้นสุดที่ร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานอยู่ที่ร้อยละ 100 สมการกราฟมาตรฐานสามารถนำมาใช้หาปริมาณของซิลิกาอสัณฐานให้มีความถูกต้องแม่นยำในตัวอย่างทดสอบอื่น ๆ โดยแทนค่า X คือค่า IN_{AM}/IN_{Al} ของตัวอย่างที่ต้องการทดสอบเพื่อหาค่า y คือค่าร้อยละปริมาณของซิลิกาอสัณฐาน

รูปที่ 3 แสดงกราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของดินขาวเผาพบว่ากราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันที่ตำแหน่ง 2-Theta ที่ 15-26 ซึ่งเป็นตำแหน่งของซิลิกาออสันฐาน intensity ของแต่ละกราฟไม่สามารถสังเกตความแตกต่างได้อย่างชัดเจนนั้นต้องทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นด้วย software เท่านั้นค่าความเข้มข้นที่ได้จะมีค่าแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4 ในขณะที่พื้นที่ใต้กราฟความเข้มข้นของอลูมินาออกไซด์คงที่ทุก ๆ อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาเท่ากับ 13.58 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแต่ละตัวอย่างจะแปรผันตรงกับปริมาณซิลิกาออสันฐานที่เกิดขึ้นเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 2 แสดงในตารางที่ 4 พบว่าดินขาวเผาจะมีปริมาณซิลิกาออสันฐานอยู่ระหว่างร้อยละ 14.18-4.64 โดยน้ำหนักดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมงจะมีปริมาณซิลิกาออสันฐานมาก และนอกจากนั้นดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง จะมีปริมาณซิลิกาออสันฐานน้อยที่สุดคิดเป็นร้อยละ 4.64 โดยน้ำหนัก

สังเกตได้ว่าการเผาดินขาวเผาที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาสูงทำให้ความเข้มข้นค่าจะลดต่ำลง [10] หรือปริมาณซิลิกาที่เป็นออสันฐานจะแปรผกผันตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นซึ่งจากคุณสมบัติของซิลิกาออสันฐานปริมาณซิลิกาออสันฐานส่งผลต่อการเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลานสังเกตได้จากข้อมูลปฏิกิริยาปอซโซลานจากตารางที่ 4

3.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ผสม

จากตารางที่ 5 แสดงกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสม ที่อายุทดสอบต่างๆ พบว่ากำลังอัดซีเมนต์เพสต์ควบคุมมีกำลังอัด 488.70 820.50 และ 1229.29 กก./ซม² ที่อายุ 3 28 และ 60 วัน ตามลำดับ และซีเมนต์เพสต์ที่ผสมด้วยดินขาวเผากำลังอัดต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมที่อายุ 3 และ 28 วัน แต่อย่างไรก็ตามกำลังอัดจะเริ่มเพิ่มขึ้นและมีค่ามากกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมที่อายุ 60 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าดินขาวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 4 ชั่วโมง มีกำลังอัดสูงที่สุดที่อายุ 3 28 และ 60 วัน โดยมีกำลังอัดสูงสุดถึง 413.90

770.38 และ 1302.73 กก./ซม² ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกับส่วนผสมอื่นในทุกๆอายุกำลังอัดทดสอบและดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 8 ชั่วโมง มีกำลังอัดต่ำสุดอายุ 3 28 และ 60 วัน มีกำลังอัด 329.37 723.86 และ 1234.79 กก./ซม²

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าซิลิกาออสันฐานในดินขาวเผาจะเริ่มทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้าใช้เวลานาน แสดงผลเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานออกมาที่อายุทดสอบ 60 วัน ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวปราจีนกำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมที่อายุดังกล่าว เป็นการแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติความเป็นปอซโซลานของดินขาวเผา

จากการทดสอบกำลังอัดพบว่าดินขาวเผาที่แทนที่ปูนซีเมนต์จะให้กำลังอัดที่มากกว่าปูนซีเมนต์แต่จะเกิดขึ้นในระยะยาว บ่งบอกได้ว่าดินขาวเผาเหมาะสมเป็นวัสดุปอซโซลานใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. อภิปรายผลและสรุปผล

4.1 สมการมาตรฐานที่ใช้ในการหาปริมาณซิลิกาออสันฐานคือ $y = 0.051x^3 - 0.367x^2 + 2.832x$ โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบคือ การทดสอบต้องมาจากการผสมของผสมซึ่งมีซิลิกาไดออกไซด์ออสันฐานซิลิกาไดออกไซด์ที่เป็นผลึก และอลูมินาออกไซด์มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ควบคุมอัตราส่วนผสมอลูมินาออกไซด์ให้คงที่ 2 กรัมการแปรผันของ AM:C ต้อง 100:0 80:20 60:40 40:60 และ 20:80 เท่านั้น

4.2 ดินขาวเผาเป็นวัสดุปอซโซลาน class N มีองค์ประกอบเคมีของซิลิกาไดออกไซด์อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมแก่การทดสอบปริมาณซิลิกาออสันฐาน

4.3 การวิเคราะห์ดินขาวเผาที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ 600 700 และ 800 ใช้ระยะเวลาในการเผา 6 และ 8 ชั่วโมง ส่งผลต่อปริมาณซิลิกาออสันฐานพบว่าที่อุณหภูมิสูงและระยะเวลาในการเผานานปริมาณซิลิกาออสันฐานจะลดลง

4.4 ปริมาณซิลิกาออสันฐานมีผลโดยตรงกับกำลังอัดและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน กล่าวคือเมื่อตัวอย่าง

ดินขาวเผามีปริมาณซิลิกาอสัณฐานสูง กำลังอัดและการเกิดปฏิกิริยาจะสูงในลักษณะแปรผันตรงต่อกัน

4.5 การทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวเผา โดยการใช้ดินขาวเผาแทนที่ปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 ที่อายุ 60 วัน ให้กำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม แสดงให้เห็นว่าดินขาวเผาจะแสดงความเป็นปอซโซลานที่อายุ 60 วัน

ตารางที่ 5 แสดงผลของกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ด้วยดินขาวเผา

Type	Compressive Strength (%)		
	3 days(ksc.)	28 days(ksc.)	60 days(ksc.)
OPC	488.70 (100.00)	820.50 (100.00)	1229.29 (100.00)
KT600T4	413.90(84.69)	770.38(93.89)	1302.73(105.97)
KT600T6	391.02(80.01)	761.09(92.75)	1294.96(105.34)
KT600T8	384.84(78.74)	759.84(92.60)	1289.61(104.90)
KT700T4	368.78(75.46)	751.12(91.54)	1274.55(103.68)
KT700T6	360.04(73.67)	745.66(90.87)	1260.68(102.55)
KT700T8	352.19(72.06)	740.19(90.21)	1256.93(102.24)
KT800T4	347.41(71.08)	737.45(89.87)	1245.74(101.33)
KT800T6	336.53(68.86)	730.15(88.98)	1239.99(100.87)
KT800T8	329.37(67.39)	723.86(88.22)	1234.79(100.44)

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] McCaffrey R., 2002. Golbal Cement and Lime Environmental Science. 15-19.
- [2] American Society for Testing and Materials., 2001. ASTM C 618 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete. In Annual Book of ASTM Standards.
- [3] KedsarinPimraksa, PrinyaChindaprasirt., 2008. Lightweight bricks made of diatomaceous earth, lime and gypsum. Ceramic International. 2954-2958.
- [4] Rukzon S., Chindaprasirt P., Mahachi R. 2009 Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash. International Journal of Minerals Metallurgy and Material. 242-247.
- [5] ปริญญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2547. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
- [6] Guilherme C., Romido F., Luis T., Eduard F., Simone H. 2010. Influence of partical size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash. Cement and Concrete Composite. 529-534.
- [7] สุธรรม ศรีหล่มศักดิ์. 2543. ปริมาณวิเคราะห์โดยเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 111-124.

- [8] Wunchock K., Theerawat S., Chai J. 2011. Effect of Palm oil Fuel Ash Fineness on Packing Effect and Pozzolanic Reaction of Blended Cement Paste. *Procedia Engineering*. 361-369.
- [9] Mehta P.K., 2002. Greening of The Concrete Industry for Sustainable Development. *Concrete International*. 23-28.
- [10] Hamad M.A., Khattab I.A. 1981. Effect of the combustion process on the structure of rice hull silica. *Thermochimica Acta*. 343-439.
- [11] Burachat C., Tavisan K. 2002. Durability of Concrete Contain Black RHA from Rice Mill. *KMUTT Research and Journal*. 378-389.